

凝集体生命圏：海洋炭素循環の未知制御機構の解明

Aggregate-biosphere: Unveiling hidden regulatory processes in the oceanic carbon cycle

課題番号：19H05667

永田 俊 (NAGATA Toshi)

東京大学・大気海洋研究所・教授



研究の概要

海洋における大規模な炭素鉛直輸送の主要媒体である凝集体を生息場とする微生物・ウイルス群集を「凝集体生命圏」として新たに概念化し、凝集体の生成・発達・崩壊に関わる主要な制御要因として提唱する。異分野の専門家の結集のもとに新たな切り口から理解を深め、これまで見逃されていた凝集体生命圏による海洋炭素循環の制御機構を解明する。

研究分野：海洋生物地球化学、微生物生態学

キーワード：生物炭素ポンプ、微生物群集、ウイルス、凝集体、物質循環

1. 研究開始当初の背景

海洋表層で光合成生産された有機物の沈降によって駆動される炭素鉛直輸送機構を「生物炭素ポンプ」と呼ぶ。このポンプによって、大量の炭素が鉛直輸送され、その一部は海洋中・深層に100～1000年の時間スケールで貯留される。これは、人間活動（化石燃料の燃焼）による年間炭素排出量を上回る規模であり、大気中二酸化炭素濃度の調節を介して、地球の気候にも大きな影響を及ぼす。生物炭素ポンプを駆動する有機物の実体は、浮遊生物やその残渣（死骸や排出物）粒子の凝集により生成する有機凝集体である。そのため、炭素鉛直輸送量は、凝集体の動態によって強く支配される。しかしその制御機構は未解明であり、気候変動に対する海洋生態系の応答や、二酸化炭素吸収能力の変化をより高い精度で予測する上でのボトルネックになっている。

現在一般的に用いられている凝集モデルは単純な物理モデルであり、粒子の凝集・分散動態を粒子数、衝突確率、接着確率のみで記述する。このモデルが提案された80年代には、海洋微生物群集の生物量や組成についての知見が限られていた為、ここでは生物過程が全く考慮されていない。しかし近年、次世代型遺伝子解析技術が海洋微生物解析に利用されるようになり、驚くほど多様な微生物（原核生物、菌類や原生生物を含む真核生物）やウイルスの群集が海洋環境中に存在することや、これまでに知られていなかった微生物群集の機能が明らかになってきた。これ

を受け、これまで未知であった微生物・ウイルス群集と有機物の相互作用が、凝集体動態の支配を介して、海洋の大規模炭素循環を制御する可能性についての新しい議論が、国際的に急速に活発化している。

2. 研究の目的

本研究では、凝集体を生息場とする微生物の群集を「凝集体生命圏」として新たに概念化し、有機凝集体の生成・発達・崩壊に関わる主要な制御要因として提唱する。異分野融合的なアプローチを用いることで、凝集体生命圏の複雑な振る舞いを、新たな切り口から解き明かし、これまで見逃されていた凝集体生命圏による炭素鉛直輸送の制御機構を解明する事を目的とする。

3. 研究の方法

凝集体生命圏に関わる問いを、船舶観測、実験、数理モデルから解明する。以下の3つのサブテーマを設ける。（1）構造に関する問い：凝集体生命圏の構成種に一般的な特徴はあるか？（2）機能に関する問い：凝集体動態の制御に関わる主要な生物間相互作用と物質代謝はなにか？（3）応答に関する問い：環境条件が変わると凝集体生命圏とそれが駆動する炭素鉛直輸送はどのような応答をするか？密接に関連するこれらの問いを、粒子動態、炭素循環、微生物・遺伝子解析、生物情報科学、数理モデリングの専門家の学際的な協力のもとに迫る。

4. これまでの成果

(1) **我が国初となる凝集体観測基盤の構築に成功**：海洋に広く分布する凝集体を、深度別に、できるだけ非破壊的に捕集し、それを遺伝子解析や顕微鏡観察、また、物理化学的性状の解析に供する必要がある。初年度における方法検討の中で、マリンスノーキャッチャー (MSC/Giant MSC) が、この研究目的に最も適していると判断し、手法の検討を進めた。この装置を使うと、大容量の海水を深度別に採水することができる。採水後、MSC を甲板に垂直に立てたまま捕縛し、2-3 時間静置する。この間に、MSC の下部に沈殿した凝集体を回収し、各種分析に供する。本装置の運用は、国内の研究船では初めてとなるため、作業の安全性を確保しながら、効率的にサンプリングを行うための入念な検討を行った後、新青丸 KS-21-4 次航海 (2021 年 3 月 11 日~3 月 21 日) では、北海道南方海域において、



図1 Giant MSC による凝集体観測

本格的な凝集体観測に成功した (図1)。得られたサンプルは、粒子解析、顕微鏡解析、遺伝子解析、有機物解析、代謝活性解析、に供され、2021 年度以降に、凝集体生命圏を構成する

、原核生物、ウイルス、真核生物に関する、世界的にも例を見ない包括的なデータを得る予定である。

(2) **ウイルスの重要性を示唆**：先行研究である Tara Oceans プロジェクトで得られたデータを新しい切り口から解析し、ウイルスの海洋における分布パターンから、凝集体生命圏の構成員としてのウイルスの重要性を示唆した (Endo et al. 2020, Kaneko et al. 2021)。生物炭素ポンプの機能制御におけるウイルスの役割については国際的に大きな議論が起き始めているが、本成果は、この流れの中で先駆的な位置を占める。

(3) **ホルマリン固定サンプルからの遺伝子リカバリープロトコルの最適化に成功**：時系列セジメントトラップで捕集したホルマリン固定サンプルから遺伝子をレスキューするプロトコルの最適化に成功した (Shiozaki et al. 2021)。これにより定点 K2 などで集められた時系列セジメントトラップのサンプルを用いた遺伝子解析の可能性が大きく開けた。今後、アーカイブ試料を用いた凝集体生命圏の過去復元といった、当初計画の想定以上の成果が得られる可能性が見えてきた。

(4) **水温が凝集体の分解を支配する主要因子である可能性を示唆**：データ解析により、海洋中層の水温が、炭素鉛直輸送効率に大きな影響を及ぼす可能性を示唆した。この成果は、水温変化に対する凝集体生命圏の応答を理解するうえで極めて重要である (Honda 2020)。

5. 今後の計画

(1) サブテーマ 1：MSC/Giant MSC 観測を、外洋域を含めて展開する。凝集体生命圏の構造的な特徴、その普遍性、変動についての解析を進め、成果をまとめる。

(2) サブテーマ 2：MSC/Giant MSC 観測で得られたサンプルを用いて、凝集体生命圏の代謝機能の解析を進め、成果をまとめる。

(3) サブテーマ 3：培養実験を実施し、異なる環境条件下での凝集体生命圏の挙動を調べる。数理モデリングと実験解析の連携により、凝集体生命圏の環境応答に関する解析を進め、成果をまとめる。

6. これまでの発表論文

- (1) Meng L. et al. (2021) Quantitative assessment of NCLDV-host interactions predicted by co-occurrence analyses. **mSphere** 受理済
- (2) Kaneko H. et al. (2021) Eukaryotic virus composition can predict the efficiency of carbon export in the global ocean. **iScience**, 24, 102002
doi.org/10.1016/j.isci.2020.102002
- (3) Shiozaki T. et al. (2021) A DNA metabarcoding approach for recovering plankton communities from archived samples fixed in formalin. **PLOS ONE**, doi:10.1371/journal.pone.0245936.
- (4) Endo H. et al. (2020) Biogeography of marine giant viruses reveals their interplay with eukaryotes and ecological functions. **Nature Ecology and Evolution**, 4, 1639-1649.
doi.org/10.1038/s41559-020-01288-w
- (5) Honda M. C. (2020) Effective vertical transport of particulate organic carbon in the western North Pacific subarctic region. **Frontiers in Earth Science** 8:366.
doi: 10.3389/feart.2020.00366

7. ホームページ等

<http://bg.aori.u-tokyo.ac.jp/member/nagata/>

プレスリリース

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-09-08>

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-01-15>